Article, Published Version

Gendler, L.V.

Das Gesetz der rationellen Fahrgeschwindigkeit von Binnenschiffen auf einem Fahrwasser mit unterschiedlicher Tiefe

Mitteilungen der Forschungsanstalt für Schiffahrt, Wasser- und Grundbau; Schiffahrt Schriftenreihe

Das Gesetz der rationellen Fahrgeschwindigkeit von Binnenschiffen auf einem Fahrwasser mit unterschiedlicher Tiefe

Kand. d. techn. Wiss. L.V. Gendler

Zentrales Forschungsinstitut für Dieselmotoren
"CNIDI", Leningrad

Manuskripteingang März 1969

I.

Der Fahrwiderstand R eines Schiffskörpers hängt in hohem Maße vom Profil des Fahrwassers - seiner Breite und Tiefe - ab. Bild 1 zeigt die von [2] übernommenen Darstellungen für die Abhängigkeit von R von der Fahrgeschwindigkeit v eines Schiffes für eine Reihe von Werten der relativen Fahrwassertiefe $\frac{h}{T}$ (T - Tiefgang des Schiffes).

Bei geringen Wassertiefen wächst der Widerstand R stark an. Damit wächst auch die für den Vortrieb des Schiffes aufzuwendende Arbeit und der Kraftstoffverbrauch.

Es liegt deshalb die Erkenntnis nahe, daß es bei veränderlichem Fahrwasserprofil unrationell ist, die Fahrgeschwindigkeit eines Schiffes konstant zu halten. Zweckmäßiger ist es, unter Einhaltung einer vorgegebenen Durchschnittsgeschwindigkeit je nach Profil des Fahrwassers die Fahrgeschwindigkeit auf den Flachwasserabschnitten herabzusetzen, um dann die verlorene Zeit auf den Tiefwasserabschnitten wieder aufzuholen.

Der vorliegende Beitrag behandelt deshalb das Gesetz der optimalen Verteilung der Fahrgeschwindigkeit auf einem Fahrwasser mit unterschiedlichem Profil.

In [2] heißt es: " Im Ergebnis von Untersuchungen, die beginnend mit dem Jahre 1954 durchgeführt wurden, konnte festgestellt werden, daß von den Schiffsführern in Unkenntnis der zulässigen Fahrzustände der Schiffe beim Einsatz auf Flüssen und Kanälen ständig ein hoher Mehrverbrauch an Kraftstoff zugelassen wird, der in einer Reihe von Fällen 100 % übersteigt."

In [3] werden zwar nicht so hohe, aber nichtsdestoweniger durchaus beachtliche Werte genannt, die die potentielle Effektivität der Optimierung aufzeigen.

II.

Wir wollen ein Fahrwasser durch eine Reihe von Abschnitten mit unveränderlichem Profil approximieren. Wenn wir diese Abschnitte als hinreichend lang voraussetzen, betrachten wir eine quasistationäre Aufgabe, wenn wir nur die stationäre Bewegung auf ihnen berücksichtigen. Im Rahmen der Aufgabenstellung genügt es, das Fahrwasserprofil mit einem einzigen Parameter - der angenommenen Tiefe h - zu charakterisieren. Für einen Abschnitt mit h = const ist der Widerstand lediglich eine Funktion der Geschwindigkeit.

Die Gesamtkosten für die Güterbeförderung können hinsichtlich ihrer Abhängigkeit von der Fahrgeschwindigkeit in folgende drei Elemente unterteilt werden: Kosten, die mit steigender Fahrgeschwindigkeit wachsen bzw. abnehmen und Kosten, die von der Fahrgeschwindigkeit unabhängig sind.

Das erste Element bilden die Kosten für Kraftstoff. Diese Kosten sind dem Kraftstoffverbrauch je Wegeinheit Q proportional. Bei konventionellen Schiffen kann der Verbrauch durch eine monoton ansteigende Funktion Q(v) dargestellt werden. Bei Spezialschiffen, wie z.B. Tragflügelschiffen und ähnlichen Fahrzeugen, steigt die Funktion Q(v) in bestimmten Grenzen von v, die den stabilen Eintauchverhältnissen entsprechen, monoton an. Unter Berücksichtigung dieser Grenzen können die folgenden Überlegungen auch auf diese Schiffe ausgedehnt werden. Sind die Funktionen bekannt, durch die der Wirkungsgrad des Propellers und des Motors bestimmt wird, und wurde für den zu betrachtenden Wegabschnitt die Funktion R(v) ermittelt, kann die Funktion Q(v) jederzeit bestimmt werden.

Es sei bemerkt, daß die Kosten für Schmierstoffe zwecks Vereinfachung in die Kosten für Kraftstoff einbezogen wurden und nicht gesondert berücksichtigt werden.

Das zweite Element stellt die Kosten dar, die proportional der Fahrzeit angenommen werden können. Wenn man die verbrauchte Kraftstoffmasse mit B bezeichnet, kann man für die laufenden Kosten je Wegeeinheit auch

$$B = \frac{k}{v} \tag{1}$$

schreiben, worin k = "Dringlichkeitskoeffizient" bedeutet. Dieser Begriff wird später erklärt. (Anm.d.Red.: Unter dem "Dringlichkeitskoeffizienten" werden die volkswirtschaftlichen Aufwendungen für den jeweiligen Transport verstanden, wie aus den später folgenden Erläuterungen hervorgeht.)

Das dritte Element stellt die Kosten für die Hafenbedienung dar, zu der z.B. die Be- und Entladearbeiten zu zählen sind. Diese Kosten haben keinen Einfluß auf die Bestimmung der optimalen Fahrgeschwindigkeit. Deshalb werden wir im folgenden nur die Kosten für den eigentlichen Transport analysieren, die durch die Kostensumme Q + B der beiden ersten Elemente dargestellt werden.

Der Einfachheit halber blieb die Tatsache unberücksichtigt, daß durch die Mitführung von Treibstoffvorräten die Nutzlast des Schiffes verringert und die Kosten beeinflußt werden, obwohl natürlich auch die Menge des unterwegs verbrauchten Kraftstoffes von der Fahrgeschwindigkeit abhängt. Im Schiffsbetrieb kann sich dies jedoch nicht auf die optimale Geschwindigkeit auswirken.

Die optimale Geschwindigkeit v_m, die dem Minimum der Aufwendungen $(Q + B)_{min}$ entspricht, kann ausgehend von folgender Voraussetzung bestimmt werden:

$$\frac{d}{dv}(Q + B) = \frac{dQ}{dv} + \frac{dB}{dv} = 0. \tag{2}$$

Entsprechend (1) ist

$$\frac{dB}{dv} = - \frac{k}{v^2} . \tag{3}$$

Dann erhält die Bedingung (2) folgendes Aussehen:

$$k = v^2 \frac{dQ}{dv} \tag{4}$$

Mit der Einführung der Variablen G - dem Kraftstoffverbrauch in der Zeiteinheit - und unter Berücksichtigung dessen, daß

$$Q = \frac{G}{v}, \quad \frac{dQ}{dv} = \frac{v.\frac{dG}{dv} - G}{v^2},$$

erhalten wir schließlich die Differentialgleichung für die optimale Fahrt

$$k = v \frac{dG}{dv} - G, \tag{5}$$

deren Lösung $v = v_m$ ist.

Die Gleichung (5) wurde zuerst von Ju. P. Petrov [3] bei seiner Untersuchung der hinsichtlich des Kraftstoffverbrauchs jeweils optimalen Fahrgeschwindigkeiten bei einer Wasserstraße mit veränderlichen Fahrwasserbedingungen bei einer gegebenen mittleren Fahrgeschwindigkeit (Beförderungsdauer) aufgestellt. Bei einer solchen Aufgabenstellung erforderte die Lösung des Problems die Anwendung von Methoden der Variationsrechnung.

Wir wollen uns der grafischen Lösung zuwenden. Bild 2 zeigt die Aufwendungen Q, B und Q + B als Funktion von v. Die grafischen Darstellungen in den Bildern 3 und 4 dienen zum Aufsuchen von v_m auf denjenigen Fahrwasserabschnitten, die von den Tiefen $h = \infty$, h_1, h_2, ... mit den Bekanten

$$Q(v)_{h=\infty,\, h_1,\, h_2,\, \ldots} \quad \text{oder} \quad G(v)_{h=\infty,\, h_1,\, h_2,\, \ldots}$$

charakterisiert werden.

Die Darstellung im Bild 3 ergibt sich unmittelbar aus der Gleichung (2) - das Optimum $v = v_m$ wird durch den Vergleich der Differentialquotienten (differenziert nach der Geschwindigkeit) der Kosten für Kraftstoff einerseits und der der Fahrzeit proportionalen Kosten des zweiten Elements (beide auf die Wegeeinheit bezogen) bestimmt.

Die Darstellung im Bild 4 ergibt sich aus der Gleichung (4). In diesem Falle entsprechen die Optima $v = v_m$ den Abszissen der Schnittpunkte γ_∞, γ_1, γ_2, ... der vom Pol P ausgehenden Strahlen mit den Kurven der Funktionen $G(v)_{h = \infty}$, h_1, h_2, ... P wird von der Ordinate $\overline{OP} = - K$ bestimmt.

Von der Richtigkeit der Darstellung kann man sich leicht überzeugen, wenn man berücksichtigt, daß die Strecke $\overline{OP}$ für jede Funktion $G(v)_{h=h_i}$ als Differenz der Koordinate G und der Kotangente $\frac{v}{dv/_{dG}} = v\frac{dG_i}{dv}$ der Umkehrfunktion v(G) dargestellt werden kann:

$$\overline{OP} = G - v\frac{dG}{dv} = -k.$$

Aus Bild 2 ist ersichtlich, daß, wenn $v > v_m$ ist, die Kosten B abnehmen, wobei jedoch infolge des Kraftstoffmehrverbrauchs die Gesamtbeförderungskosten ansteigen.

Wenn $v < v_m$ ist, wird zwar weniger Kraftstoff verbraucht, jedoch auf Kosten der Zunahme der Kosten B, so daß die Transporte weniger ökonomisch durchgeführt werden als bei $v = v_m$. Hieraus folgt insbesondere, daß es falsch ist, lediglich den Kraftstoffverbrauch zu berücksichtigen, wenn es zu beurteilen gilt, ob ein Transport wirtschaftlich ist.

III.

Bei einem gegebenen Schiff, gegebener Abladung und Fahrwassertiefe hängt G eindeutig von v ab. Die jeweils optimale Geschwindigkeit v_{mi} für einen beliebigen Abschnitt mit der Wassertiefe h_i und folglich auch die optimale mittlere Geschwindigkeit v_{ma} auf dem gesamten gegebenen Fahrbereich mit unterschiedlichen Wassertiefen hängt dann eindeutig von k ab, da beide monoton ansteigende Funktionen von k sind. Da die optimale Geschwindigkeit $v_{m\infty}$ unter normalen Bedingungen (tiefes, breites und staues Fahrwasser) ebenfalls eindeutig mit dem "Dringlichkeitskoeffizieten" k in Beziehung steht, können in diesem Falle beide Parameter - $v_{m\infty}$ und k - gleichermaßen als Kriterien für die optimale Fahrgeschwindigkeit angesehen werden.

Aus der Abb. 4 folgt die elementare grafische Bestimmung von v_{mi} für einen Abschnitt mit einer beliebigen Tiefe h_i nach dem bekannten Wert $v_{m\infty}$, die darauf begründet ist, daß alle Tangenten an die Kurven der Funktionen $G(v)_{h=\infty, h_1, h_2 \ldots h_i}$ in den Punkten, die durch die Abszissen v_{mi} bestimmt werden, den gemeinsamen Pol P auf der Ordinate haben.

In Übereinstimmung mit Formel (1) stellt k die Kostensumme B aller in der Masse des verbrauchten Kraftstoffes ausgedrückten Kosten des zweiten Elements (Kosten je Zeiteinheit) dar.

Durch den Wert k werden im Prinzip alle Arten volkswirtschaftlicher Aufwendungen für den Transport berücksichtigt. Bei der Berechnung von k müssen sowohl die direkten Kosten des Schiffseigners für das Bedienungspersonal, die Abschreibungen und die Unterhaltung des Schiffes als auch die Kosten des Kunden berücksichtigt werden. Diese hängen von der Art des zu befördernden Gutes ab bzw. sie sind darauf zurückzuführen, daß die Ware für die Dauer des Transports aus dem Umlauf gezogen wird oder daß auf dem Transport Qualitätsverluste oder ähnliche Ereignisse eintreten, die im Endergebnis bei der Verrechnung zwischen dem Schiffseigner und dem Kunden berücksichtigt werden. Darum nimmt z.B. k (und damit auch $v_{m\infty}$) bei wertvollen, leicht verderblichen oder aus anderen Gründen dringend zu befördernden Gütern den größten Wert an.

Die Dringlichkeit der Beförderung kann auch von besonderen Bedingungen abhängen, durch die die Ankunft an den End- bzw. Zwischenpunkten der Transportstrecke beeinflußt wird. So führt z.B. das unerwartete Eintreffen eines Schiffes in einem Bestimmungshafen, der noch nicht bereit ist, das Schiff abzufertigen oder zu entladen, zu unvorhergesehenen Liegezeiten und folglich zu zusätzlichen Kosten. Diese Bedingungen können gleichfalls durch den Koeffizienten k berücksichtigt werden. Damit geht die Bedeutung dieses Koeffizienten über den Rahmen der bisherigen Definition hinaus. Die Bestimmung des Wertes k ist offensichtlich keine leichte Aufgabe. Sie kann oft nur in grober Näherung gelöst werden.

Es wäre jedoch unrichtig, daraus zu schlußfolgern, daß die ganze Aufgabe des Suchens nach dem Gesetz der optimalen Beförderung einen rein akademischen Charakter besitzt. Man muß berücksichtigen, daß die Notwendigkeit, eine ökonomisch zweckmäßige Dringlichkeit der Beförderung zu finden, im Grunde genommen durchaus nicht ausschließlich an eine Wasserstraße mit wechselden Fahrwasserbedingungen gebunden ist. In der Regel besteht immer die Vorstellung von einer gewissen optimalen, "kommerziellen" Fahrgeschwindigkeit $v_{m\infty}$ für normale Bedingungen.

Hierbei ist es für unsere Betrachtungen unwesentlich, ob diese Vorstellung auf Erfahrungen oder Berechnungen beruht, ob sie für einen gegebenen Transport konkretisiert oder für bestimmte Transporte ermittelt wurde. All dies stellt im Grunde genommen eine ökonomische Aufgabe dar, die nicht Gegenstand des vorliegenden Beitrags ist. Unabhängig davon, nach welchem Verfahren die Dringlichkeit bestimmt wird, werden, sobald k feststeht, die optimalen Geschwindigkeiten auf den Fahrwasserabschnitten und daraufhin die mittlere Geschwindigkeit v_{ma} und die optimale Fahrzeit t_m auf jeden Fall nach der Gleichung (5) ermittelt. Somit hängt t_m nicht nur von der Länge, sondern auch vom Profil des Fahrwassers ab.

Bisher wurde nur der Fall untersucht, daß es die Antriebsleistung des betrachteten Schiffes gestattet, die optimalen Geschwindigkeiten zu erreichen. Es ist klar, daß auf Fahrwasserabschnitten, auf denen das theoretische Optimum der Fahrgeschwindigkeit mit einer gegebenen Antriebsanlage wegen deren begrenzten Leistung nicht erreicht werden kann, die Fahrt mit der maximal erreichbaren Geschwindigkeit optimal ist. Daraus folgt z.B., daß das Problem der Optimierung bei langsam fahrenden Schiffen gar nicht aktuell ist. Bei diesen Schiffen ist es nur notwendig, eine mögliche Überlastung der Motoren auf Flachwasserabschnitten zu vermeiden.

IV.

Wir wollen nun in allgemeinen Zügen auf gangbare Wege zur Realisierung des Gesetzes der optimalen Fahrt mit automatischen Mitteln eingehen. Wir stellen dieses Gesetz in der allgemeinen Form durch die Gleichung

$$f_m (v, h, k) = 0 \tag{6}$$

dar, in der der Index "m" bei v entfällt.

Auf der Grundlage der Gleichung (5) kann die Funktion f_m für den gesamten Bereich der Werte v, h, für den die Funktion G(v,h) bekannt ist, jederzeit bestimmt werden.

Nun kann die Verwirklichung des Programms für die optimale Fahrt einem programmgesteuerten System übertragen werden, das über ein Stellglied zur Steuerung des Systems in Übereinstimmung mit dem vorgegebenen Koeffizienten k verfügt.

Der Hauptvorzug der Methode der Optimierung nach einem Programm besteht in der Einfachheit der erforderlichen Mittel. Theoretisch muß man die Methode des automatischen Aufsuches des Optimums als vollkommener erachten, da sie umfassender ist und nicht die vorherige Kenntnis der Funktion G(v,h) erfordert. Bei der praktischen Realisierung dieser Methode muß jedoch mit Schwierigkeiten gerechnet werden, die im wesentlichen auf die Notwendigkeit zurückzuführen sind, das Schiff in einen Zwischenprozeß des Aufsuchens von Gesetzmäßigkeiten einzubeziehen, denen die Größen G und v bei veränderlichen Werten h unterliegen, wodurch der Prozeß der Optimierung wesentlich verzögert wird. Aufmerksamkeit verdient außerdem die Möglichkeit, daß man auf das automatische Aufsuchen des Optimums nur bei der Aufstellung des erforderlichen Optimierungsprogramms zurückgreift. Danach kann das Suchsystem demontiert werden, und die Optimierung erfolgt unter Betriebsbedingungen nach dem auf die genannte Weise aufgestellten Programm.

Wir wollen zeigen, daß das Optimierungsprogramm für Dieselmotoren, die mit einem Festpropeller direkt verbunden sind, einem speziell zu diesem Zweck entwickelten Geschwindigkeitsregler zugrunde gelegt werden kann. Wir schreiben das Gleichungssystem für die stationäre Bewegung des Komplexes "Schiff-Antriebsanlage" in der allgemeinen Form. Dieses System wird bei einem konkreten Schiff und gegebener Belastung vollständig bestimmt durch:

$$
\begin{aligned}
f_1 \ (R, v, h) &= 0 \text{ (für den Schiffskörper)},\\
f_2 \ (r, v, n) &= 0 \text{ (für den Propeller)},\\
f_3 \ (M_b, R, n) &= 0 \text{ (für den Propeller)},\\
f_4 \ (M_e, M_b, n) &= 0 \text{ (für den Wellenleitung)},\\
f_5 \ (M_e, Z, n) &= 0 \text{ (für den Motor)}.
\end{aligned}
\tag{7}
$$

hierin bedeuten:

n = Drehzahl des Propellers (Motors)

M_e, M_b = Drehmoment des Propellers bzw. des Motors

Z = Koordinate des Kraftstoffreglers.

Nach Vereinigung des Gleichungssystems mit der Gleichung (5) und Ausschaltung der fünf Variablen, erhalten wir das Gesetz der optimalen Fahrt, das folgendes Aussehen hat:

$$F_m \ (n, Z, k) = 0. \tag{8}$$

Eine solche Funktion kann im Prinzip von einem programmgesteuerten Spezialgeschwindigkeitsregler realisiert werden. Dieser muß über ein Stellglied zur Beeinflussung des Programms in Übereinstimmung mit dem geforderten Wert des "Koeffizienten der Dringlichkeit" k und über eine hinreichend effektive Stabilisierungseinrichtung zur Gewährleistung der dynamischen Stabilität der Regelung bei großem Integralfaktor verfügen, der den für unseren Zweck geeigneten Programmen eigen ist. Der Programmregler muß außerdem eine Vorrichtung betätigen, die die Kraftstoffzufuhr nach einer bestimmten Gesetzmäßigkeit beschränkt und damit eine Überlastung des Motors verhindert.

Das vom Regler durchzuführende Programm wird bei beliebig festgelegtem Wert k = const durch folgende Gleichung ausgedrückt:

$$F_m(n, Z, k=const) = 0 \qquad (8a)$$

Die in [3] genannten Rechenergebnisse zeigen, daß die erforderlichen statischen Kennlinien hinreichend geradlinig verlaufen. Dieser Umstand trägt dazu bei, die Konstruktion des Reglers wesentlich zu vereinfachen.

Die Methode der Optimierung auf der Grundlage der Programmierung der Beziehung zwischen h und Z hat im Vergleich zur Ausnutzung der Beziehung zwischen v und h nach der Gleichung (6) neben den Vorzügen, die sich aus der größeren Einfachheit und Zuverlässigkeit der Messung der Größen n und Z ergeben, noch einen weiteren Vorzug. Im allgemeinen hängt der Einfluß des Fahrwassers auf den Fahrwiderstand eines Schiffes nicht nur von der Tiefe h, sondern auch von der Breite des Fahrwassers und dem Wellengang ab. Die Gleichung (6) kann man formal verallgemeinern, indem man unter der Tiefe h einen gewissen abgeleiteten Wert versteht, in dem der Einfluß weiterer Faktoren berücksichtigt wird. Die direkte Messung dieses abgeleiteten Wertes h ist natürlich unmöglich, und damit wird auch die Programmierung nach der Gleichung (6) in den Fällen undurchführbar, in denen es notwendig ist, neben der Tiefe andere Faktoren zu berücksichtigen. Die h in der Gleichung (8) ersetzende Größe Z spiegelt indirekt den Gesamteinfluß aller Charakteristiken des Fahrwassers wider. Deswegen ergibt die Einführung des Faktors Z in das Programm in gewisser Näherung die allgemeinste Lösung. Die dabei erreichbare Genauigkeit hängt im Prinzip davon ab, inwieweit es gelingt, die Gesamtheit der Faktoren, die den Einfluß des Fahrwassers auf den Fahrwiderstand des Schiffes charakerisieren, durch einen entsprechenden Parameter auszudrücken, der in unserem Falle die abgeleitete Tiefe h ist.

Schlußfolgerungen

1. Mit Hilfe der Gleichung (5) kann die optimale Verteilung der Fahrgeschwindigkeit auf einem veränderlichen Fahrwasser gefunden werden, die bei gegebener "Dringlichkeit" ein Minimum an Beförderungskosten gewährleistet. Folglich ist diese Gleichung die Grundlage für die Lösung der Aufgabe der Fahroptimierung unabhängig von den Methoden der technischen Realisierung dieser Aufgabe.

2. Die "Dringlichkeit" muß auf der Grundlage ökonomischer Erwägungen vorgesehen werden. Sie wird durch die Kennziffer k bewertet, in der die Gesamtheit der Kosten für die Beförderung proportional zu deren Dauer berücksichtigt werden.

3. Die optimale Beförderungsdauer auf einem gegebenen Fahrwasserabschnitt hängt vom "Dringlichkeitskoeffizienten" k und vom Fahrwasserprofil ab.

4. Die automatische Einhaltung der optimalen Fahrzustände mit Hilfe eines zu diesem Zwecke entwickelten Programmreglers, der mit einem Organ zum Einstellen des Koeffizienten k ausgerüstet ist, erscheint möglich. Bei Vorhandensein eines solchen Reglers kann die "Dringlichkeit der Beförderung" auf einfachstem Wege vorgegeben und während der Fahrt bei Bedarf (wenn z.B. die geplante Ankunftszeit infolge irgendwelcher Störungen oder unvorhergesehener Ereignisse in Frage gestellt ist) korrigiert werden.

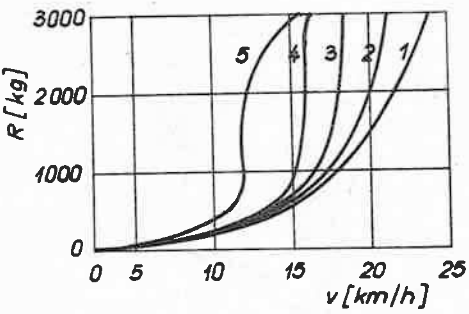
Literaturnachweis

[1] Pavlenko, G.E.: Methodik für die Bestimmung der zulässigen Fahrzustände von Schiffen auf Flüssen und Kanälen.
Kiev, Izd. AN USSR 1959

[2] Pavlenko, G.E.: Die Regelung der Fahrzustände und die Automatisierung der Schiffsführung auf Flüssen
Kiev, Izd. AN USSR 1961

[3] Petrov, Ju.P.: Die optimale Fahrtregelung von Schiffen auf einem Fahrwasser mit veränderlicher Tiefe.
Sammelband "Automatisierung in der Schiffahrt", Trudy LIVTa, vyp. 59, Leningrad 1964

[4] Gendler, L.V.: Über ein optimales Programm zur Regelung der Drehzahl von Schiffsmotoren auf Flachwasser
Trudy CNIDI, vyp. 55, Leningrad 1967



1) $\frac{h}{T} = 23$ 2) $\frac{h}{T} = 6$ 3) $\frac{h}{T} = 4$

4) $\frac{h}{T} = 3$ 5) $\frac{h}{T} = 2$

Bild 1: Schiffswiderstand bei verschiedenen Wassertiefen

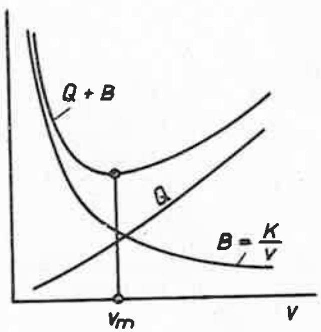


Bild 2: Kosten für die Beförderung

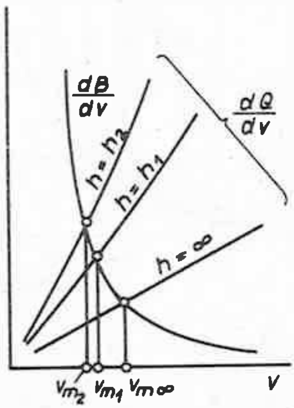


Bild 3: Diagramm zur Bestimmung der optimalen Fahrgeschwindigkeit bei unterschiedlichen Wassertiefen

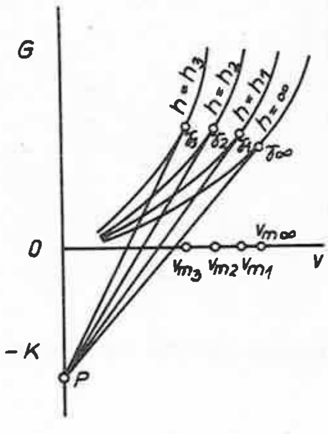


Bild 4: Diagramm zur Bestimmung der optimalen Fahrgeschwindigkeit bei unterschiedlichen Wassertiefen